

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号  
特開2000-200106  
(P2000-200106A)

(43)公開日 平成12年7月18日(2000.7.18)

(51)Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テーマコード(参考)
G 0 5 B 19/05		G 0 5 B 19/05	J
11/32		11/32	A
H 0 4 J 3/24		H 0 4 J 3/24	
H 0 4 L 29/08		H 0 4 L 13/00	3 0 7 A

審査請求 未請求 請求項の数17 O L 外国語出願 (全 29 頁)

(21)出願番号	特願平11-344592	(71)出願人	399117121 アジレント・テクノロジーズ・インク AGILENT TECHNOLOGIE S, INC. アメリカ合衆国カリフォルニア州パロアル ト ページ・ミル・ロード 395
(22)出願日	平成11年12月3日(1999.12.3)	(72)発明者	ジョン・シー・エイドソン アメリカ合衆国カリフォルニア州94303, パロアルト, ロス・ロード・3294
(31)優先権主張番号	2 0 5 1 1 5	(74)代理人	100063897 弁理士 古谷 馨 (外2名)
(32)優先日	平成10年12月3日(1998.12.3)		
(33)優先権主張国	米国 (US)		

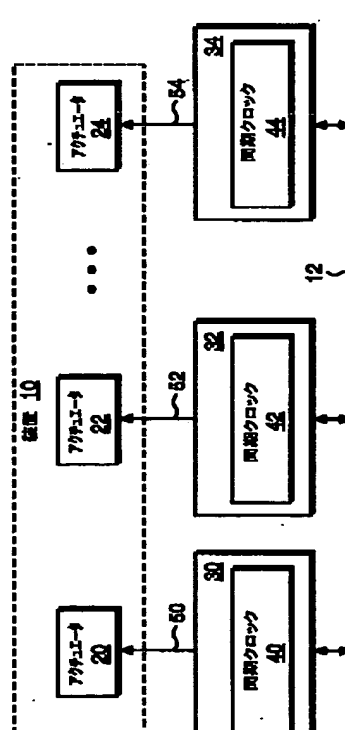
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 時間同期を使用する動作制御

#### (57)【要約】

【課題】時間同期技術を使用して、各軸に対するアクチュエータの制御を調和させる動作制御システムを提供する。

【解決手段】各々が動作制御システムの単一の軸に沿った動作を制御し、それらの集成的動作を時間同期技術を使用して調和させる一組の制御ノード(30~34)を備える動作制御システムである。各制御ノード(30~34)は動作制御システムの一軸に対応し、同期クロックを備え、同期クロック(40~44)を同期させる為のプロトコルを使用する。動作制御システムの各軸への一連の制御値の印加は、同期クロック(40~44)を使用して調和される。



**【特許請求の範囲】**

【請求項1】各々が動作制御システムの軸に対応する一組の制御ノード(30~34)を備える動作制御システムであって、各制御ノードは同期クロックを有し、各々が一連の制御値に対応する軸のアクチュエータに印加するものであり、この際に制御ノード(30~34)が同期クロックを使用してアクチュエータ(20~24)への制御値の印加を調和して行うことからなる、動作制御システム。

【請求項2】各制御ノード(30~34)が、通信リンクを介して同期クロックを同期させるためのプロトコルを利用する、請求項1の動作制御システム。

【請求項3】各制御ノード(30~34)が、対応するアクチュエータ(20~24)に印加する対応する一連の制御値の各制御値を、対応する軸に対する動作制御機能に従って時間値と関連付けることからなる、請求項1の動作制御システム。

【請求項4】各制御ノード(30~34)が、対応する時間値が対応する同期クロックにより提供される時間と等しいときに、対応するアクチュエータ(20~24)への各制御値の印加をトリガすることからなる、請求項3の動作制御システム。

【請求項5】各制御ノード(30~34)が、対応する軸に対する動作制御機能に従ってスケーリングされる一組の処理リソースを備える、請求項1の動作制御システム。

【請求項6】同期クロックを備え、一連の制御値を、動作制御システムの対応する軸に対するアクチュエータに印加するための手段を具備する制御ノードであって、アクチュエータへの制御値の印加が、同期クロックを使用して調和して行われることからなる、動作制御システムの制御ノード。

【請求項7】同期クロックを同期させるためのプロトコルを通信リンクを介して利用するための手段を更に備える、請求項6の制御ノード。

【請求項8】アクチュエータに印加する各制御値を、対応する軸に対する動作制御機能に従って時間値に関連付けるための手段を更に備える、請求項6の制御ノード。

【請求項9】対応する時間値が同期クロックにより提供される時間と等しいときに、アクチュエータへの各制御値の印加をトリガするための手段、を更に備える、請求項8の制御ノード。

【請求項10】対応する軸に対する動作制御機能に従ってスケーリングされる一組の処理リソースを更に備える、請求項6の制御ノード。

【請求項11】各々が、動作制御システムの軸に対応する一組の制御ノード(30~34)であって、各々が、同期クロックを有し、各々が、対応する軸のアクチュエータに対応する一連の制御値を印加し、アクチュエータ

使用して調和して行う、1組の制御ノードと、各制御ノード(30~34)により印加される一連の制御値を指定するメッセージを各制御ノードに送信することにより、軸に適用すべき動作制御機能を決定するセレクトノード(14)を備える動作制御システム。

【請求項12】各メッセージが、動作制御機能の開始時間を更に指定することからなる、請求項11の動作制御システム。

【請求項13】各メッセージが、対応する制御ノード(30~34)内の一組のテーブルの中から、動作制御機能に適用すべき事前計算された一組の制御値を保持する1つを指定することからなる、請求項11の動作制御システム。

【請求項14】テーブル内の事前計算された制御値が、制御ノード(30~34)により生成される、請求項13の動作制御システム。

【請求項15】テーブル内の事前計算された制御値がセレクトノード(14)により生成され、制御ノードに分配される、請求項13の動作制御システム。

【請求項16】各メッセージが、動作制御機能に適用すべき対応する一連の制御値を生成するために用いられる1つ以上の式を指定することからなる、請求項11の動作制御システム。

【請求項17】各メッセージが、動作制御機能に適用すべき対応する一群の制御値を含むことからなる、請求項11の動作制御システム。

**【発明の詳細な説明】****【0001】**

【発明の属する技術分野】本発明は、システムの分野に関し、より具体的には時間同期技術を利用した動作制御に関する。

**【0002】**

【従来の技術】一般的に、動作制御システムは、製造、オフィス及び家庭環境において使用されるものを含む、広範にわたる種類の装置及びシステムに採用されている。動作制御システムは、装置又はシステムの種々の作動要素の動きを精密に制御する制御システムとして定義することが出来る。作動要素の制御可能な動きは、軸及または自由度として表わすことが出来る。代表的な動作制御システムには、各軸に対するアクチュエータと、制御値を生成し、所望の動作が必要とされるときにその制御値をアクチュエータに供給する制御回路が含まれる。

【0003】例えば、ペン式プロッタは、通常、ペンをx軸に沿って動かす作動要素と、ペンをy軸に沿って動かす作動要素とを含み、これらの作動要素がペンの動きに2つの自由度を提供している。インクの色を取り替える作動要素、及びペンを用紙に置いたり離したりするように動かす作動要素により、プロッタにおけるペンの動きに他の自由度を提供することも出来る。

を生成し、その制御値を所望の動作を実現するシーケンスでアクチュエータに供給する中央制御装置を備えている。軸間の動きを精確に調和させる為に、通常は制御値を精確なタイミングでアクチュエータに与えることが望ましい。異なるアクチュエータに対する制御値の印加に遅延又は食違いがあると、所望の動作が得られない場合もある。

【0005】例えば円を描く場合、一般に、プロッタの中央制御装置は一連のx制御値及び対応する一連のy制御値を生成する。通常は、いずれかの軸が所望の円の動きからずれることがないように、各x制御値がxアクチュエータに印加されのと同時に、対応するy制御値もyアクチュエータに印加されることが望ましい。

【0006】通常、従来の動作制御システムは、複数のアクチュエータへの制御値の同時印加を可能とする制御カードを採用することにより、制御値の印加におけるかかる精確な調和を実現している。例えば、制御カードは、2つの異なるアクチュエータに制御値を印加する為に2つの出力レジスタを含むものでも良い。このようなシステムの中央制御装置は通常、出力レジスタにロードし、その後両方の出力レジスタの出力を同時にトリガして、所望のタイミングでアクチュエータに送る。通常、カード上に出力レジスタを綿密に結合することにより、対応する制御値が実質的に同時に印加されることが保証される。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】コスト効果を高める為に、このような制御カードは一般的に、2又は4軸といった標準的な数の軸で製造される。標準的な数を上回る数の軸間で調和を図る必要がある場合は、何枚かのカードが必要となり、さらに、カード間の調整を行うためのなんらかの手段が通常は必要になる。更に、動作制御システムの部分部分が広範囲に離れている場合には、離れた部分の調和を図るためには、このような従来の制御カード間で通信を行う為の配線又は専用ネットワークの使用に対して特別な配慮が通常必要とされる。しかし、このようにすると動作制御システムのコストと複雑さが増大してしまう。一方、動作制御システムに要する軸は、このような従来の制御カードに設けられるものより少なくても良い。この場合、購入したものの使用しない余計なハードウェアにより、一般的に、動作制御システムのコストがかさむ。更に、このような従来の制御カードでは、既存の制御カードが追加の自由度に対応できない場合に、システムのアップグレードが困難となる場合がある。

【0008】

【課題を解決するための手段】各々が動作制御システムの単一の軸に沿った動きを制御し、集散的な動きを時間同期技術を用いて調和させる一組の制御ノードを有する

システムの1軸に対応し、各制御ノードは同期クロックを含み、同期クロックを同期させる為のプロトコルを使用する。動作制御システム内の各軸に対する一連の制御値の印加は、同期クロックを用いて調整される。

【0009】時間同期式の動作制御システムにおいては、1枚の制御カードが複数の軸を同時に扱うことが必要であった従来のシステムと比較して、より単純で廉価な計算リソースを各制御ノードに用いることが出来る。各制御ノードは、実施する動作制御機能並びに、特定の軸の特性に合わせて、大きさを調整したり、最適化することが出来る。動作制御機能において使用される制御ノードの数のみを用い、よけいな能力を無駄にすることは無い。時間同期式の動作制御システムにより、従来のシステムの場合には動作制御を調和させる為に要するであろう高価な専用リンクではなく、クロック同期用の通常のネットワーク通信リンクを利用することが出来る。

【0010】本発明の他の特徴及び利点は、以下の詳細な説明により明らかになるが、本発明の特定の典型的な実施態様に関して図面を参照しつつ説明することとする。

【0011】

【発明の実施の形態】図1は本(発明の)技術に基づく装置(10)用動作制御システムを示す。動作制御システムは、各々が装置(10)の一組のアクチュエータ(20~24)の1つを駆動することにより動作制御システムの単一の軸に沿った動作を制御する、一組の制御ノード(30~34)を備える。各制御ノード(30~34)は、同期した時間値を保持する対応する同期クロック(40~44)を含む。制御ノード(30~34)は同期クロック(40~44)を使って装置(10)の軸間の動作を調和させる。

【0012】制御ノード(30~34)は、同期クロック(40~44)中に保持される時間値を同期させる為の同期化プロトコルを使用する。同期化プロトコルは、同期クロック(40~44)が、装置(10)の軸間の動作を調和させるに適した精度に見合う時間値を保持するように実装される。

【0013】制御ノード(30~34)は、装置(10)に関わる動作制御機能を実行する為に、一組の制御信号(50~54)をアクチュエータ(20~24)に印加する。各制御ノード(30~34)は、対応するアクチュエータ(20~24)に印加する一組の制御値を、動作制御機能に基づいてある時間値と関連付ける。制御ノード(30~34)による制御信号(50~54)のアクチュエータ(20~24)への印加は、同期クロック(40~44)から得られる同期時間値によりトリガされる。各制御ノード(30~34)は、対応する同期クロック(40~44)をモニタし、いつ制御値を対応するアクチュエータ(20~24)に印加すべき

【0014】装置(10)は、アクチュエータ(20~24)への制御信号の印加を精確に調和させることが望ましい任意の種類の装置、あるいは、機械的、電氣的、化学的又はそれらを組み合わせた任意のシステムを表している。具体例は多数あり、その中には、プリンタやプロッタ、また、広範な産業分野で利用される製造装置等が含まれる。

【0015】以下では、装置(10)がプロッタであり、そのアクチュエータ(20)がペンのx位置を制御し、アクチュエータ(22)がペンのy位置を制御し、  
10 アクチュエータ(24)がペンの上下状態を制御する場合の1実施態様について説明する。しかしながら、この例示の実施態様に関して提供される教示内容は、より多くの軸を有する非常に複雑なシステムをも含む他の様々な装置及びシステムに容易に適用可能であることは明らかである。実際、本技術の利点の1つは、非常に複雑なシステムを、比較的単純で低コストの制御ノードと、多くの動作軸間で調和をとる精度の高い同期時間ベースとを有する分散制御システム内に構築し得ることである。

【0016】例示の実施態様における制御ノード(30~34)は、円を描く為の動作制御機能を実行することができ、ここでは、制御ノード(30~32)が、アクチュエータ(20~22)を使用して、以下の式に従ってペンのx及びy位置を、x及びy軸に沿って移動させる。

$$\text{式1} \quad x = \cos \omega t$$

$$\text{式2} \quad y = \sin \omega t$$

式1及び2により得られるx、Y位置は、制御信号(50~54)を通じてアクチュエータ(20~22)に印加される制御値を提供する。制御ノード(30~32)は、式1及び2を使用して、事前に決められた一連のt値に対してリアルタイムでx及びy制御値を計算するものであっても良い。あるいは、x及びy制御値を、事前に決められた一連のt値に対して事前に計算し、制御ノード(30~32)のテーブルに記憶しても良い。事前に決められた一連のt値は、対応するx及びy制御値をアクチュエータ(20~22)に印加する為のトリガ時間を提供するものである。

【0017】例えば方程式1及び2に従って、時間 $t_0$ において制御ノード(30)がペンをx軸に沿って位置 $x_0$ へと、そして制御ノード(32)がペンをy軸に沿って位置 $y_0$ へと移動させるものと想定する。制御ノード(30)は同期クロック(40)をモニタし、それが $t_0$ に達したときに制御値 $x_0$ をアクチュエータ(20)に印加してペンを位置 $x_0$ へと移動させる。同様に、制御ノード(32)は同期クロック(42)をモニタし、それが $t_0$ に達したときに制御値 $y_0$ をアクチュエータ(22)に印加してペンを位置 $y_0$ へと移動させる。x及びy軸に沿った移動における精確な調和は、 $t_0$ 時間

確な同期により実現される。

【0018】各々が単一の軸に対する動作制御を提供する制御ノード(30~34)を利用した動作制御システムにより、単一の制御カードが複数の軸を扱う従来型のシステムと比較して、より単純で廉価な計算リソースを各制御ノード(30~34)において利用することが可能となる。各制御ノード(30~34)はその軸において実施される動作制御機能並びに、特定の軸の特性に合わせて大きさを調整したり最適化したりすることが出来る。特定数の動作軸に必要な数だけの制御ノード(30~34)しか必要とせず、必要以上に能力を無駄にすることがない。

【0019】一実施態様では、同期クロック(40~44)中に保持される時間値を同期させる為のプロトコル及び関連する機構は、米国特許第5,566,180号に記載されているものである。例えば、同期クロック(40~44)の各々は、通信リンク(12)を介して伝送される時間データパケットの送受信時間の計算に基づいて、それぞれ局所的に記憶された時間値を調整する為の回路を備えることができる。このプロトコルは、通信リンク(12)上の比較的低い帯域幅を使用して、比較的低コストで精確なクロック同期を提供するものである。

【0020】通信リンク(12)は、種々の通信メカニズムの1つ又は複数を使って実現することが出来る。同期クロック(40~44)により提供される動作制御の調和及び同期プロトコルにより、複数の軸を制御する従来の制御カード間の動作制御を調和させる為に必要な、専用のより高価なリンクではなく、通常のネットワーク通信リンクを通信リンク(12)として採用することが出来る。一実施態様では、通信リンク(12)は、イーサネット通信ネットワークである。他の実施態様では、通信リンク(12)は、プロセス制御環境専用のLonTalkフィールドレベル制御バスである。他の実施態様では、通信リンク(12)は、時分割多重アクセス(TDMA)又はトークンリングプロトコルで実施することもでき、他にも多くの可能性がある。

【0021】図2は、制御ノード(30)の一実施態様を示すものである。制御ノード(32~34)は実質的に同じ方法で実現出来る。制御ノード(30)は、装置(10)に関わる動作制御機能を実施するプロセッサ(60)を備える。プロセッサ(60)は、アクチュエータ(20)に印加する各制御値を時間値に関連付ける。プロセッサ(60)が、この関連付けを、動作制御計算を使ってオンザフライで実行するようにしても、または、予め計算するようにしてもよい。あるいは、関連付けを予め計算しておき、後で、アクチュエータ(20)に制御値を印加する際にプロセッサ(60)が読み出す為に、それらをテーブル中に記憶するようにしてもよい。

2)への物理インターフェース(64)と、タイミングデータバケット及びフォローアップバケットを、同期クロック(40~44)中に保持された時間値を同期させる為のprotocolsに従って、ノード(32~34)で交換するタイムバケット(時間バケット)レコグナイザ(62)とを備えている。

【0023】例えば、タイムバケットレコグナイザ(62)は、第一のタイミングデータバケットを生成し、それを物理インターフェース(64)を介し、通信リンク(12)を通じて送信する。タイムバケットレコグナイザ(62)は、第一のタイミングデータバケットを物理インターフェース(64)に送信した時点で、同期クロック(40)をサンプリングして第一のタイムスタンプを得る。第一のタイムスタンプは、タイムバケットレコグナイザ(62)が第一のタイミングデータバケットを物理インターフェース(64)に伝送した、制御ノード(30)中の局所時間を表わすものである。その後、タイムバケットレコグナイザ(62)はフォローアップバケットを生成し、それを通信リンク(12)を介して送信する。フォローアップバケットは第一のタイムスタンプを含む。制御ノード(32~34)は、制御ノード(30)により生成されたタイムスタンプ及び第一のタイミングデータバケットを受信する。次に、制御ノード(32)は、フォローアップバケットを受信し、フォローアップバケット中に含まれる第一のタイムスタンプとタイミングデータバケットの受信に関連するタイムスタンプとの間の差異を利用して、同期クロック(42~44)に必要な調整を決定する。

【0024】同様に、タイムバケットレコグナイザ(62)は、制御ノード(32~34)のうちの1つにより生成された第二のタイミングデータバケットを物理インターフェース(64)を介して受信する。タイムバケットレコグナイザ(62)は、第二のタイミングデータバケットを受信した時に同期クロック(40)から局所時間値をラッチする。このラッチした時間値が、第二のタイミングデータバケットの受信に対するタイムスタンプを与える。その後、タイムバケットレコグナイザ(62)は、第二のタイミングデータバケットを発信した制御ノード(32~34)からフォローアップバケットを受信する。タイムバケットレコグナイザ(62)は、第二のタイムスタンプをフォローアップバケットから取り出す。フォローアップバケットからのタイムスタンプとタイミングデータバケットの受信に対するタイムスタンプとの間の差異が、同期クロック(40~44)間の同期を維持する為に同期クロック(40)に必要とされる相対的調整量を表わす。

【0025】同期クロック(40)は、十分に安定な発振器によって駆動されるカウンタとして実施される。カウンタの最下位数ビットを加算器として実施して、タイ

ムバケットに含まれる対応するタイムスタンプとの差異の計算結果に従って、同期クロック(40)を効果的に速くしたり遅くしたりするために、発振器周期の増分を時折、増加させたり減少させたりできるようにする。

【0026】プロセッサ(60)は、同期時間値を同期クロック(40)から得、一連の制御値をデジタル-アナログ変換器(以下DAC)(66)に供給するためのトリガとしてこの同期時間値を用いる。例えば、制御ノード(30)に関する動作制御機能を、表1に示すように定義することができる。

【0027】

【表1】

表 1

$\Delta t$ 値	制御値
0.010	2
0.020	3
0.025	4
0.030	5

【0028】 $\Delta t$ 値は、 $t_0$ 時間値を基準とした時間値である。各 $\Delta t$ 値は、アクチュエータ(20)に印加される制御値と関連付けられている。例えば、制御値「2」は $t_0+0.010$ の時点で印加され、制御値「3」は時間 $t_0+0.020$ の時点で印加される。プロセッサ(60)は、同期クロック(40)をモニタし、それが、時間 $t_0+0.010$ に達すると、制御値「2」をDAC(66)に書き込む。同様に、プロセッサ(60)は、同期クロック(40)をモニタし、同期クロックが時間 $t_0+0.020$ に達すると制御値「3」をDAC(66)に書き込む。

【0029】制御ノード(32~34)は、時間値に関連付けられた制御値を用いてその動作制御機能の部分を制御ノード(30)と協働して実行する。例えば、制御ノード(32~34)は、 $t_0$ を基準にして $\Delta t$ の間隔で印加される制御値のテーブルを各々が有することができる。制御ノード(32~34)は、それぞれの同期クロック(42~44)をモニタし、それぞれの制御値を $\Delta t$ 間隔で印加して、制御ノード(30)による制御値の印加との調和を保つ。

【0030】DAC(66)は、アナログ制御信号を信号処理部(68)に供給し、次に、この信号処理部が制御信号(50)をアクチュエータ(20)に送る。他の実施態様では、制御ノード(30)がデジタル制御値を制御信号(50)によってアクチュエータ(20)に供給することができ、アクチュエータ(20)は、DAC(66)及び信号処理部(68)を備えることができる。

を、実施する特定の動作制御機能及びタイミング条件等に応じてスケリングすることができる。例えば、プロセッサ(60)が比較複雑な動作方程式を用いてオンザフライで制御値を計算しなければならない場合、及び/又は制御値を非常に短い時間間隔の間に計算しなければならない場合、充分なメモリリソースと共に比較的高力なプロセッサが必要となる。一方、動作制御の方程式が比較的単純であるか、又は予め計算されている場合、あるいは、制御値を計算する為の時間間隔が比較的長い(例えば、比較的ゆっくりとした動作)場合、より単純で低コストのプロセッサ及びメモリリソースを使用することができ、これにより制御ノード(30)のコストを低減することができる。

【0032】図3は、セレクトノード(14)を備えた、装置(10)の動作制御システムを示すものである。制御ノード(30~34)は、それぞれに対応する一組のテーブル1~n<sub>1</sub>、1~n<sub>2</sub>及び1~n<sub>3</sub>を含む。各テーブル1~n<sub>1</sub>、1~n<sub>2</sub>及び1~n<sub>3</sub>は、対応するアクチュエータ(20~24)に印加する一組の制御値を保持している。テーブル1~n<sub>1</sub>、1~n<sub>2</sub>及び1~n<sub>3</sub>中の各制御値は、上述したようにその制御値の印加をトリガするために使用される時間値に関連付けられている。

【0033】テーブル1~n<sub>1</sub>、1~n<sub>2</sub>及び1~n<sub>3</sub>のうちの任意の1つ又は複数中の制御値を、セレクトノード(14)により予め計算して、通信リンク(12)を介して制御ノード(30~34)に配信することができる。代替的に、テーブル1~n<sub>1</sub>、1~n<sub>2</sub>及び1~n<sub>3</sub>のうちの任意の1つ又は複数中の制御値を、プロセッサリソースによって、対応する制御ノード(30~34)中で予め計算することができる。セレクトノード(14)が、通信リンク(12)を介して式を制御ノード(30~34)に配信して、対応するテーブル1~n<sub>1</sub>、1~n<sub>2</sub>及び1~n<sub>3</sub>に対する制御値を制御ノード(30~34)が予め計算することが出来るようにすることもできる。

【0034】セレクトノード(14)は、メッセージを通信リンク(12)を介して制御ノード(30~34)に送信することにより、装置(10)に適用する動作制御機能を決定することができる。このメッセージは、テーブル1~n<sub>1</sub>、1~n<sub>2</sub>及び1~n<sub>3</sub>のうちのどれを使用するかを指定し、また、動作制御機能の開始時間t<sub>0</sub>を指定するものである。例えば、セレクトノード(14)は、制御ノード(30)のテーブル1が午後2時(2PM)に印加開始されるものと指定するメッセージを制御ノード(30)に送信し、制御ノード(32)のテ

ーブル3が午後2時に印加開始されるものと指定するメッセージを制御ノード(32)に送信することができる。これにตอบสนองして、制御ノード(30~32)は、それぞれの同期クロック(40~42)をモニタし、それぞれの同期クロック(40~42)が午後2時に到達すると、指定された制御値の印加を開始する。

【0035】代替的に、セレクトノード(14)は、使用する制御値テーブルを作成するための式を含み、動作制御機能の開始時間t<sub>0</sub>を指定するメッセージを通信リンク(12)を介して制御ノード(30~34)に送信することにより、装置(10)に適用すべき動作制御機能を決定することができる。例えば、セレクトノード(14)は、 $x = \cos \omega t$ から得たx制御値の印加を午後2時に開始することを指定するメッセージを制御ノード(30)に送り、 $y = \sin \omega t$ から得たy制御値の印加を午後2時に開始することを指定するメッセージを制御ノード(32)に送る。これにตอบสนองして、制御ノード(30~32)は、これらの方程式を使って制御値を事前計算し、次に、それぞれの同期クロック(40~42)をモニタし、そしてそれぞれの同期クロック(40~42)が午後2時に到達すると、事前計算した制御値の印加を開始する。

【0036】他の代替例では、セレクトノード(14)は、事前計算した制御値及び関連する時間値を含み、動作制御機能の開始時間t<sub>0</sub>を指定するメッセージを通信リンク(12)を介して制御ノード(30~34)に送信することにより、装置(10)に適用する動作制御機能を決定することができる。

【0037】上記の本発明の詳細な説明は、例示のために行ったものであり、本発明を網羅することも、開示した特定の実施態様に限定することも意図したものではない。すなわち、本発明の範囲は、特許請求の範囲によって規定されるものである。

【図面の簡単な説明】

【図1】本技術に従う装置用の動作制御システムを示す。

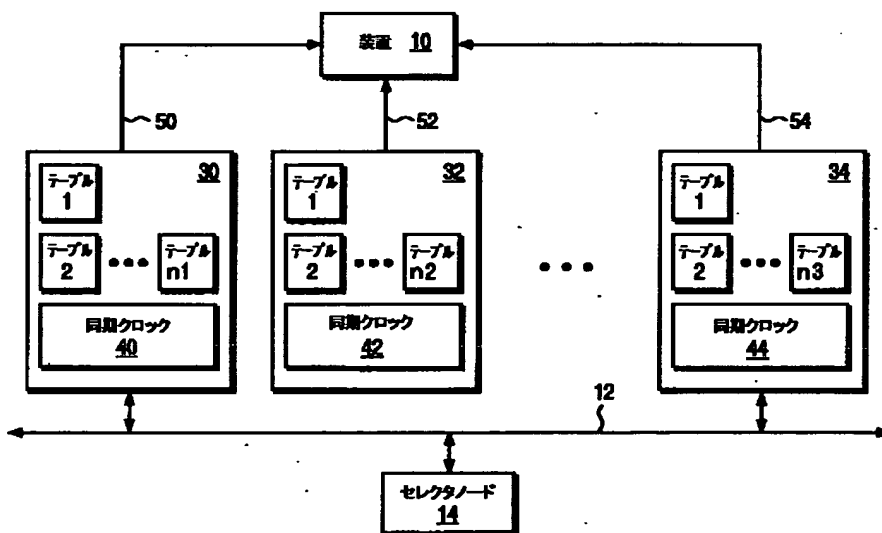
【図2】タイムバケットレコグナイザを備える制御ノードの一実施態様を示す。

【図3】セレクトノードを備える動作制御システムを示す。

【符号の説明】

14           セレクトノード  
20~24       アクチュエータ  
30~34       制御ノード  
40~44       同期クロック

【図2】



395 Page Mill Road P  
alo Alto, California  
U. S. A.

## 【外国語明細書】

## 1 Title of Invention

## MOTION CONTROL USING TIME SYNCHRONIZATION

## 2 Claims

1. A motion control system having a set of control nodes (30-34) each corresponding to an axis of the motion control system, each control node (30-34) having a synchronized clock and each applying a series of control values to an actuator for the corresponding axis such that the control nodes (30-34) coordinate application of the control values to the actuators (20-24) using the synchronized clocks (40-42).
2. The motion control system of claim 1, wherein each control node (30-34) participates in a protocol for synchronizing the synchronized clocks (40-42) via a communication link.
3. The motion control system of claim 1, wherein each control node (30-34) associates each control value of the corresponding series of control values to be applied to the corresponding actuator (20-24) to a time value according to a motion control function for the corresponding axis.
4. The motion control system of claim 3, wherein each control node (30-34) triggers an application of each control value to the corresponding actuator (20-24) when the corresponding time value equals a time provided by the corresponding synchronized clock (40-42).



5. The motion control system of claim 1, wherein each control node (30-34) includes a set of processing resources which are scaled according to a motion control function for the corresponding axis.

6. A control node for a motion control system, the control node having a synchronized clock and having means for applying a series of control values to an actuator for a corresponding axis of the motion control system such that the application of the control values to the actuator is coordinated using the synchronized clock.

7. The control node of claim 6, further comprising means for participating in a protocol for synchronizing the synchronized clock via a communication link.

8. The control node of claim 6, further comprising means for associating each control value to be applied to the actuator to a time value according to a motion control function for the corresponding axis.

9. The control node of claim 8, further comprising means for triggering an application of each control value to the actuator when the corresponding time value equals a time provided by the synchronized clock.

10. The control node of claim 6, further comprising a set of processing resources which are scaled according to a motion control function for the corresponding axis.

11. A motion control system, comprising:  
a set of control nodes (30-34) each corresponding to an axis of the motion control system, each control node

(30-34) having a synchronized clock and each applying a corresponding series of control values to an actuator for the corresponding axis such that the control nodes (30-34) coordinate application of the control values to the actuators (20-24) using the synchronized clocks (40-42);

selector node (14) that determines a motion control function to be applied to the axes by transferring a message to each control node (30-34) that specifies the series of control values to be applied by each control node (30-34).

12. The motion control system of claim 11, wherein each message further specifies a starting time for the motion control function.

13. The motion control system of claim 11, wherein each message specifies one of a set of tables in the corresponding control node (30-34) that holds a set of pre-computed control values to be applied for the motion control function.

14. The motion control system of claim 13, wherein the pre-computed control values in the tables are generated by the control node (30-34).

15. The motion control system of claim 13, wherein the pre-computed control values in the tables are generated by the selector node (14) and distributed to the control nodes (30-34).

16. The motion control system of claim 11, wherein each message specifies one or more equations to be used to

generate the corresponding series of control values to be applied for the motion control function.

17. The motion control system of claim 11, wherein each message contains the corresponding series of control values to be applied for the motion control function.

### 3 Detailed Description of Invention

#### BACKGROUND OF THE INVENTION

##### Field of Invention

The present invention pertains to the field of systems. More particularly, this invention relates to motion control using time synchronization technology.

##### Art Background

Motion control systems are commonly employed in a wide variety of devices and systems including devices and systems used in industrial, office, and home environments.

A motion control system may be defined as a control system that provides precise control of the movement of various actuating elements of a device or system. A controllable movement of an actuating element may be referred to as an axis or a degree of freedom. A typical motion control system includes an actuator for each axis and control circuitry that generates control values and provides the control values to the actuators as needed for a desired motion.

For example, a pen-based plotter usually includes an actuating element that moves a pen along an x axis and an actuating element that moves the pen along a y axis and these actuating elements provide two degrees of freedom for pen movement. Other degrees of freedom for

pen movement in a plotter may be provided by actuating elements that change ink colors and actuating elements that move the pen into and out of contact with paper.

Prior motion control systems typically include a central controller which generates control values and provides the control values to the actuators in a sequence that will accomplish a desired motion. It is usually desirable that the control values be applied to the actuators with precise timing in order to precisely coordinate the motion among the axes. Any delay or skew in the application of control values to different actuators may cause deviation from the desired motion.

For example, a central controller in a plotter typically generates a series of x control values and a corresponding series of y control values when drawing a circle. It is usually desirable that each x control value be applied to the x actuator at the same time as the corresponding y control value is applied to the y actuator in order to prevent one axis or the other from deviating from the desired circle motion.

Prior motion control systems usually accomplish such precise coordination in the application of control values by employing control cards that enable the simultaneous application control values to multiple actuators. For example, a control card may have two output registers for applying control values to two different actuators. A central controller in such a system usually loads the output registers and then simultaneously triggers the outputs of both of the output registers to the actuators at the desired time. The tight coupling of the output

registers on a card usually ensures that the corresponding control values are applied at substantially the same time.

Typically, such control cards are manufactured in standard numbers of axis, such as 2 or 4 axis, in order to be cost effective. If coordination is needed among more axes than a standard number then several cards may be necessary and some scheme must usually be devised for coordination among the cards. In addition, if portions of a motion control system are widely separated then coordination of the remote portions usually requires special attention to wiring or the use of specialized networks for communication among such prior control cards.

Unfortunately, this usually increases the cost and complexity of a motion control system. On the other hand, fewer axes may be needed for a motion control system than are provided on such a prior control card. In that case the extra hardware purchased but not used usually adds unneeded costs to a motion control system. In addition, such prior control cards may make it difficult to upgrade a system if existing control cards cannot accommodate additional degrees of freedom.

#### SUMMARY OF THE INVENTION

A motion control system is disclosed having a set of control nodes each of which controls motion along a single axis of the motion control system and which coordinate their collective motions using time synchronization technology. Each control node corresponds to an axis of the motion control system and each control node includes a synchronized clock and participates in a protocol for synchronizing the

synchronized clocks. The application of a series of control values to each axis in the motion control system is coordinated using the synchronized clocks.

A motion control system based on time synchronization enables the use of simpler and cheaper computing resources in each control node in comparison to prior systems in which one control card must handle multiple axes simultaneously. Each control node may be sized and optimized for the characteristics of a particular axis as well as the motion function to be implemented. Only the exact number of control nodes used in motion function are used and extra capacity is not wasted. A motion control system based on time synchronization enables the use of a conventional network communication link for clock synchronization rather than a specialized higher cost link that might otherwise be needed to coordinate motion control as may be the case prior systems.

Other features and advantages of the present invention will be apparent from the detailed description that follows.

#### **DETAILED DESCRIPTION**

Figure 1 shows a motion control system for a device 10 according to the present techniques. The motion control system includes a set of control nodes 30-34 each of which controls motion along a single axis of the motion control system by driving one of a set of actuators 20-24 of the device 10. Each control node 30-34 includes a corresponding synchronized clock 40-44 which holds a

synchronized time value. The control nodes 30-34 coordinate the motions among the axes of the device 10 using the synchronized clocks 40-44.

The control nodes 30-34 participate in a synchronization protocol for synchronizing the time values held in the synchronized clocks 40-44. The synchronization protocol is provided so that the synchronized clocks 40-44 hold time values that agree to an accuracy suitable for coordinating the motions among the axes of the device 10.

The control nodes 30-34 apply sets of control signals 50-54 to the actuators 20-24 to perform a motion control function associated with the device 10. Each control node 30-34 associates a series of control values to be applied to the corresponding actuator 20-24 to a time value according to the motion control function. The applications of the control signals 50-54 to the actuators 20-24 by the control nodes 30-34 are triggered by synchronized time values obtained from the synchronized clocks 40-44. Each control node 30-34 monitors its corresponding synchronized clock 40-44 to determine when to apply a control value to its corresponding actuator 20-24.

The device 10 represents any type of device or any type of mechanical, electrical, chemical, or combination system in which precise coordination of the application of control signals to the actuators 20-24 is desirable.

Examples are numerous and include printers, plotters, and manufacturing systems found in a wide variety of industries.

The following discussion focuses on an example embodiment in which the device 10 is a plotter in which the actuator 20 controls the x position of a pen and the actuator 22 controls the y position of the pen and the actuator 24 controls the up/down status of the pen. It is apparent, however, that the teachings provided with respect to the example embodiment are readily applicable to a variety of other devices and systems including very complex systems with many more axes. In fact, one advantage of the present techniques is that very complex systems may be arranged into a distributed control system with relatively simple low-cost control nodes and an accurate synchronized time base that provides coordination among many axes of motion.

The control nodes 30-34 in the example embodiment may implement a motion control function for drawing a circle in which the control nodes 30-32 use the actuators 20-22 to move the x and y positions of the pen along the x and y axes according to the following equations.

Eq. 1       $x = \cos \omega t$

Eq. 2       $y = \sin \omega t$

The x and y positions yielded by equations 1 and 2 provide the control values to be applied to the actuators 20-22 via the control signals 50-54. The control nodes 30-32 may compute the x and y control values in real-time for a predetermined series of t values using equations 1 and 2 or the x and y control values may be pre-computed for the predetermined series of t values and stored in tables in the control nodes 30-32. The



predetermined series of  $t$  values provide trigger times for applying the corresponding  $x$  and  $y$  control values to the actuators 20-22.

Assume for example that at time  $t_0$  the control node 30 is to move the pen to position  $x_0$  along the  $x$  axis and that the control node 32 is to move the pen to position  $y_0$  along the  $y$  axis in accordance with equations 1 and 2.

The control node 30 monitors the synchronized clock 40 and when it reaches  $t_0$  applies the control value  $x_0$  to the actuator 20 to move the pen to position  $x_0$ . Similarly, the control node 32 monitors the synchronized clock 42 and when it reaches  $t_0$  applies the control value  $y_0$  to the actuator 22 move the pen to position  $y_0$ . The precise coordination in movement along the  $x$  and  $y$  axes is accomplished by the precise synchronization of the synchronized clocks 42-42 in triggering on the  $t_0$  time value.

A motion control system using the control nodes 30-34 each of which provides motion control for a single axis enables the use of simpler and cheaper computing resources in each control node 30-34 in comparison to prior systems in which a single control card handles multiple axes.

Each control node 30-34 may be sized and optimized for the characteristics of a particular axis as well as the motion function to be implemented in that axis. Only the exact number of the control nodes 30-34 needed for the particular number of axes of motion is required and extra capacity is not wasted.

In one embodiment, the protocol and related mechanisms for synchronizing the time values held in the

synchronized clocks 40-44 are those described in U.S. Patent no. 5,566,180. For example, each of the synchronized clocks 40-44 may include circuitry for adjusting its respective locally stored time value based upon computations of the sending and receiving time of time data packets which are transferred over a communication link 12. This protocol provides accurate clock synchronization at a relatively low cost with a relatively low bandwidth utilization on the communication link 12.

The communication link 12 may be implemented with one or more of a variety of communication mechanisms. The coordination of motion control provided by the synchronized clocks 40-44 and the synchronization protocol enables the use of a conventional network communication link for the communication link 12 rather than a specialized higher cost link that might otherwise be needed to coordinate motion control among prior control cards that control multiple axes. In one embodiment, the communication link 12 is an Ethernet communication network. In another embodiment, the communication link 12 is a LonTalk field-level control bus which is specialized for the process control environment. In other embodiments, the communication link 12 may be implemented with time division multiple access (TDMA) or token ring protocols to name only a few possibilities.

Figure 2 shows one embodiment of the control node 30. The control nodes 32-34 may be implemented in a substantially similar manner. The control node 30 includes a processor 60 that implements a motion control

function associated with the device 10. The processor 60 associates each control value to be applied to the actuator 20 to a time value. The processor 60 may perform the associations on the fly using motion control calculations or may pre-compute the associations or the associations may be pre-computed and stored in a table for subsequent reading by the processor 60 when applying control values to the actuator 20.

The control node 30 includes a physical interface 64 to the communication link 12 and a time packet recognizer 62 that exchanges timing data packets and follow up packets with the nodes 32-24 according to the protocol for synchronizing the time values held in the synchronized clocks 40-44.

For example, the time packet recognizer 62 generates a first timing data packet and transfers it via the communication link 12 through a physical interface 64.

At the time that the time packet recognizer 62 transfers the first timing data packet to the physical interface 64 it samples the synchronized clock 40 to obtain a first time-stamp. The first time-stamp indicates the local time in the control node 30 at which the time packet recognizer 62 transferred the first timing data packet to the physical interface 64. Thereafter, the time packet recognizer 62 generates a follow up packet and transfers it via the communication link 12. The follow up packet includes the first time-stamp. The control nodes 32-34 receive and time stamp the first timing data packet generated by the control node 30. The control nodes 32 then receive the follow up packet and use the differences between the first time stamp contained in the follow up

packet and the time stamps associated with the reception of the timing data packet to determine any adjustments needed for the synchronized clocks 42-44.

Similarly, the time packet recognizer 62 receives a second timing data packet generated by one of the control nodes 32-34 through the physical interface 64. The time packet recognizer 62 latches a local time value from the synchronized clock 40 when the second timing data packet is received and this latched time value provides a time stamp for reception of the second timing data packet.

Thereafter, the time packet recognizer 62 receives a follow up packet from the control node 32-34 that originated the second timing data packet. The time packet recognizer 62 extracts a second time-stamp from the follow up packet. The difference between the time-stamp from the follow up packet and the time stamp for reception of the timing data packet indicates the relative adjustment needed for the synchronized clock 40 to maintain synchronization among the synchronized clocks 40-44. The difference may be computed by the processor 60.

The synchronized clock 40 is implemented as a counter driven by an oscillator with sufficient stability. The least significant few bits of the counter may be implemented as an adder so that the increment on oscillator periods may be occasionally increased or decreased to effectively speed up or slow down the synchronized clock 40 in accordance with the results of the computation of difference between time stamps for timing data packets and the corresponding time stamps contained in follow up packets.

The processor 60 obtains synchronized time values from the synchronized clock 40 and uses the synchronized time values as triggers for providing a series of control values to a digital-to-analog (DAC) converter 66. For example, a motion control function with respect to the control node 30 may be defined as shown in table 1.

Table 1.

$\Delta t$ values	control value
0.010	2
0.020	3
0.025	4
0.030	5

The  $\Delta t$  values are time values relative to a  $t_0$  time value. Each  $\Delta t$  value is associated with a control value to be applied to the actuator 20. For example, a control value of 2 is to be applied at time  $t_0 + 0.010$  and a control value of 3 is to be applied at time  $t_0 + 0.020$ . The processor 60 monitors the synchronized clock 40 and when it reaches time  $t_0 + 0.010$  writes a control value of 2 to the DAC 66. Similarly, the processor 60 monitors the synchronized clock 40 and writes a control value of 3 to the DAC 66 when the synchronized clock 40 reaches time  $t_0 + 0.020$ .

The control nodes 32-34 perform their portion of the motion control function in concert with the control node 30 using control values associated with time values. For

example, the control nodes 32-34 may each have a table of control values to be applied at  $\Delta t$  intervals relative to a  $t_0$ . The control nodes 32-34 monitor their respective synchronized clocks 42-44 and apply their respective control values at  $\Delta t$  intervals to maintain coordination with the application of control values by the control node 30.

The DAC 66 provides analog control signals to signal processing 68 which in turn drives the control signals 50 to the actuator 20. In other embodiments, the control node 30 may provide digital control values to the actuator 20 via the control signals 50 and the actuator 20 may contain the DAC 66 and signal processing 68.

The processor 60 and its related resources may be scaled according to the particular motion control function being implemented and timing requirements etc.

For example, if the processor 60 must calculate control values on the fly using relatively complex motion equations and/or must calculate control values during very brief time intervals then a relatively powerful processor may be needed along with sufficient memory resources. On the other hand, if the equations for motion control are relatively simple or pre-computed or if the time intervals for calculating control values is relatively long, i.e. for relatively slow motion, then simpler and lower cost processor and memory resources may be used thereby lowering the cost of the control node 30.

Figure 3 shows a motion control system for the device 10 which includes a selector node 14. The control nodes 30-34 include corresponding sets of tables 1-n<sub>1</sub>, 1-n<sub>2</sub>, and

1-n<sub>3</sub>, respectively. Each of the tables 1-n<sub>1</sub>, 1-n<sub>2</sub>, and 1-n<sub>3</sub> holds a set of control values to be applied to the corresponding actuators 20-24. Each control value in the tables 1-n<sub>1</sub>, 1-n<sub>2</sub>, and 1-n<sub>3</sub> is associated with a time value which is to be used to trigger the application of the control value as previously described.

The control values in any one or more of the tables 1-n<sub>1</sub>, 1-n<sub>2</sub>, and 1-n<sub>3</sub> may be pre-computed by the selector node 14 and distributed to the control nodes 30-34 via the communication link 12. Alternatively, the control values in any one or more of the tables 1-n<sub>1</sub>, 1-n<sub>2</sub>, and 1-n<sub>3</sub> may be pre-computed by the processor resources in the corresponding control node 30-34. The selector node 14 may distribute equations to the control nodes 30-34 via the communication link 12 that enable the control nodes 30-34 to pre-compute the control values for the corresponding tables 1-n<sub>1</sub>, 1-n<sub>2</sub>, and 1-n<sub>3</sub>.

The selector node 14 may determine a motion control function to be applied to the device 10 by transferring messages to the control nodes 30-34 via the communication link 12 that specify which of the tables 1-n<sub>1</sub>, 1-n<sub>2</sub>, and 1-n<sub>3</sub> is to be used and that specify a starting time  $t_0$  for the motion control function. For example, the selector node 14 may transfer a message to the control node 30 which specifies that table 1 in the control node 30 is to be applied starting at 2 PM and may transfer a message to the control node 32 which specifies that table 3 in the control node 32 is to be applied starting at 2 PM. In response, the control nodes 30-32 monitor their respective synchronized clocks 40-42 and begin applying

the specified control values when their respective synchronized clocks 40-42 reach 2 PM.

Alternatively, the selector node 14 may determine a motion control function to be applied to the device 10 by transferring messages to the control nodes 30-34 via the communication link 12 that contain equations for generating a table of control values to be used and that specify a starting time  $t_0$  for the motion control function.

For example, the selector node 14 may transfer a message to the control node 30 which specifies that  $x$  control values derived from  $x = \cos \omega t$  are to be applied starting at 2 PM and may transfer a message to the control node 32 which specifies that  $y$  control values derived from  $y = \sin \omega t$  are to be applied starting at 2 PM. In response, the control nodes 30-32 pre-compute the control values using these equations and then monitor their respective synchronized clocks 40-42 and begin applying the pre-computed control values when their respective synchronized clocks 40-42 reach 2 PM.

In another alternative, the selector node 14 may determine a motion control function to be applied to the device 10 by transferring messages to the control nodes 30-34 via the communication link 12 that contain pre-computed control values and associated time values and that specify a starting time  $t_0$  for the motion control function.

The foregoing detailed description of the present invention is provided for the purposes of illustration and is not intended to be exhaustive or to limit the invention to the precise embodiment disclosed.

Accordingly, the scope of the present invention is defined by the appended claims.



#### 4 Brief Description of Drawings

The present invention is described with respect to particular exemplary embodiments thereof and reference is accordingly made to the drawings in which:

Figure 1 shows a motion control system for a device according to the present techniques;

Figure 2 shows one embodiment of a control node which includes a time packet recognizer;

Figure 3 shows a motion control system which includes a selector node.

FIG. 1

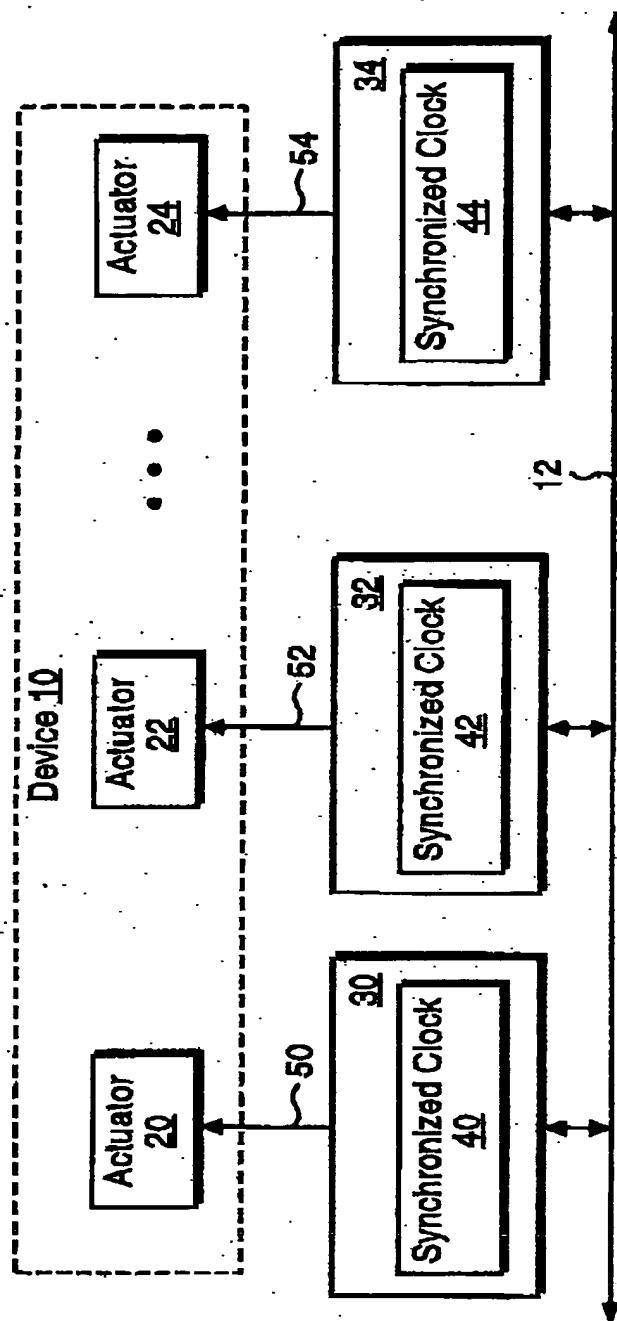


FIG. 2

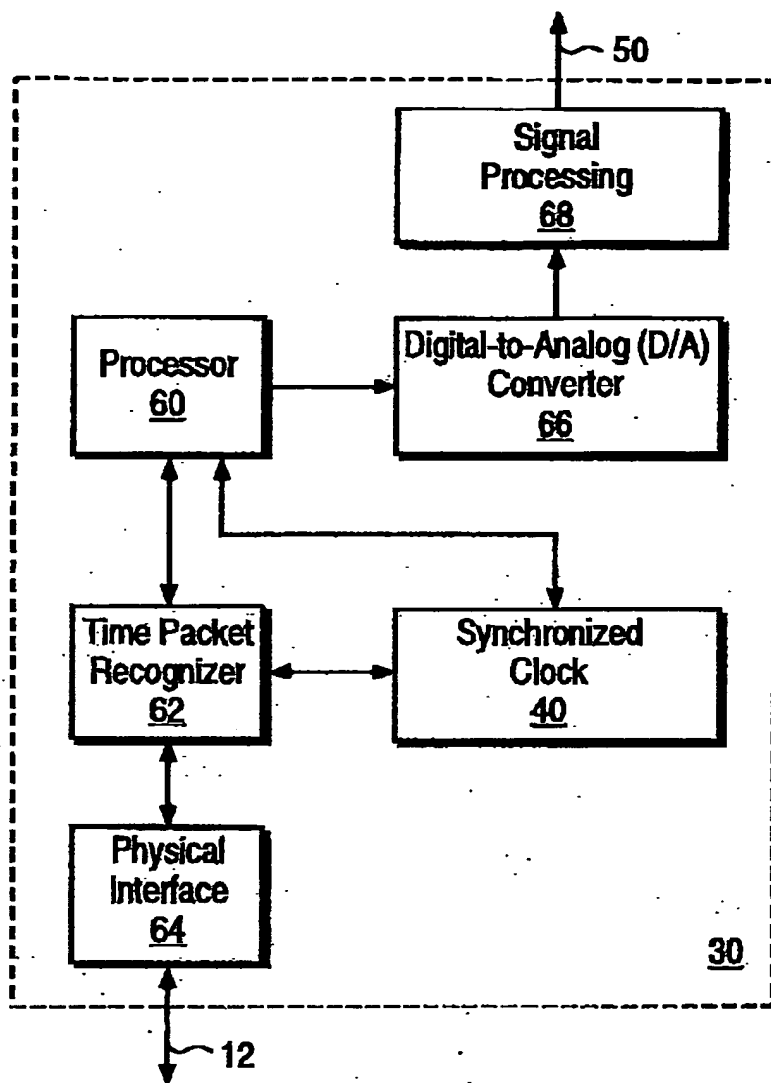
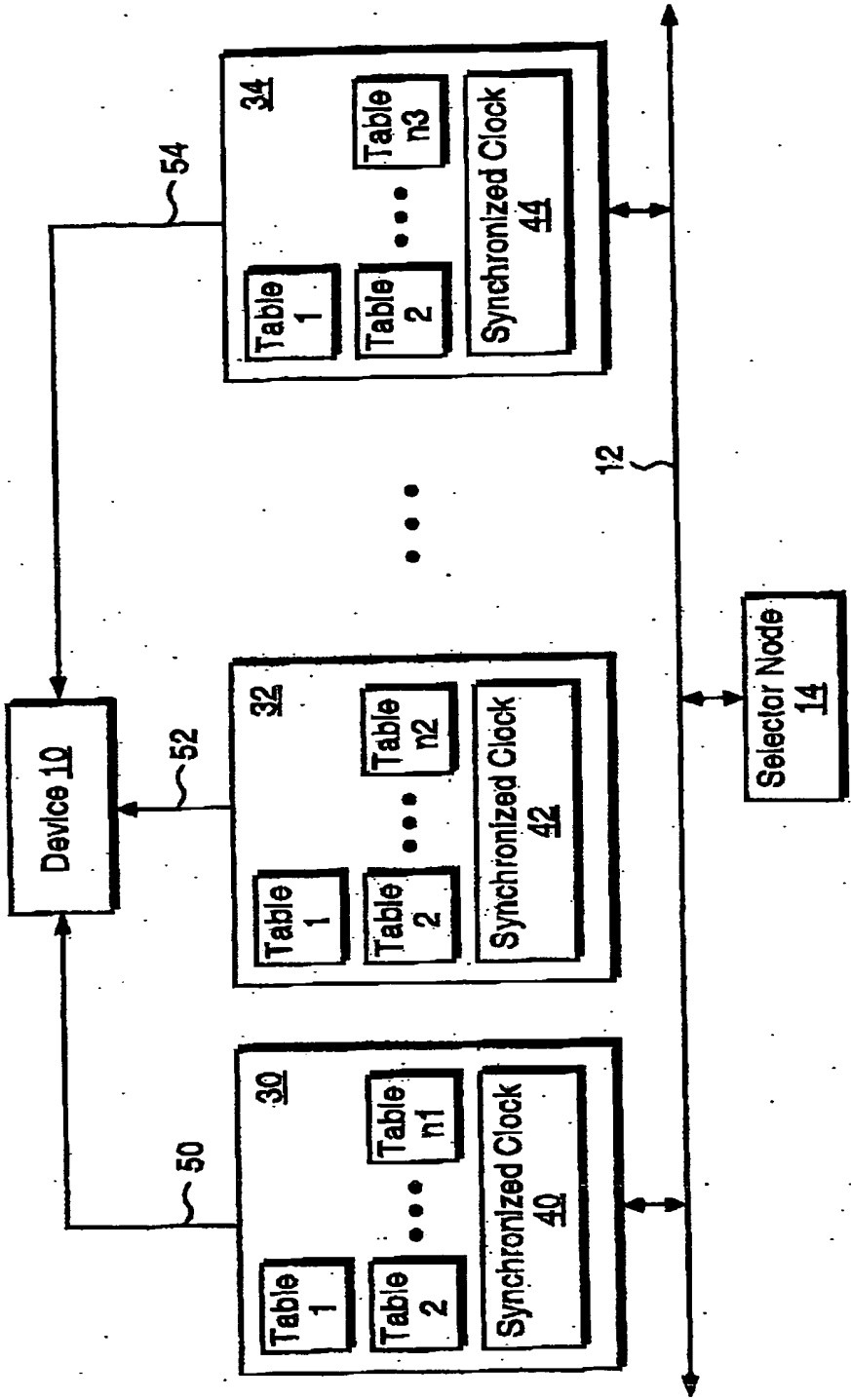


FIG. 3



# 1 Abstract

A motion control system having a set of control nodes 30-34 each of which controls motion along a single axis of the motion control system and which coordinate their collective motions using time synchronization technology.

Each control node 30-34 corresponds to an axis of the motion control system and each control node 30-34 includes a synchronized clock and participates in a protocol for synchronizing the synchronized clocks 40-42. The application of a series of control values to each axis in the motion control system is coordinated using the synchronized clocks 40-42.